POTENCIALIDADES DO USO DO BIOCHAR PARA MELHORIA DOS ATRIBUTOS EDÁFICOS

Igor Polla Marcelino[1]
Arcângelo Loss[2]
Marcio Antonio Nogueira Andrade[3]

1 Introdução

No contexto do desenvolvimento sustentável, governos e sociedades têm importantes desafios a serem enfrentados. Quanto à questão ambiental, há a necessidade premente de melhorar a gestão de resíduos, minorar a emissão de gases de efeito estufa (GEE), utilizar com parcimônia e conservar os recursos hídricos. Ao mesmo tempo em que é preciso suprir a demanda energética e produzir alimentos em quantidade e qualidade para promover o desenvolvimento humano e a qualidade de vida.

Assim, faz-se necessário a mudança do paradigma dominante, que utiliza os recursos naturais como se fossem ilimitados, sendo necessária a adoção de tecnologias que contribuam para a promoção do desenvolvimento sustentável em sua plenitude, seja do ponto de vista social, ambiental e econômico. Para tanto, a adoção de tecnologias que contemplem os três eixos indispensáveis ao desenvolvimento - conservação ambiental, geração de energia e produção de alimentos - são importantes para a seleção de uma tecnologia apropriada.

Neste contexto, é conveniente a adoção de energias renováveis, a conservação da água e a promoção da fertilidade do solo visando suprir nossas necessidades energéticas, segurança alimentar e sanitária. A FAO (2018) projeta que até 2050 terá um aumento da demanda mundial por alimentos decorrentes do crescimento populacional e do aumento do padrão de consumo dessa população. Decorrente disso, ocorre o aumento da demanda de nutrientes para atender o incremento de produção e produtividade de culturas agrícolas. Esta crescente demanda de alimentos e consequente aumento da produção de proteína animal leva ao consequente aumento da geração de dejetos animais e de outros resíduos, fazendo-se necessário o adequado tratamento dos mesmos. Caso a rota tecnológica a ser adotada para este tratamento seja incorporada

1 Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas (PGA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC. E-mail:igorpolla@gmail.com.
2 Professor Associado – PGA-UFSC, Florianópolis - SC. E-mail: arcangelo.loss@ufsc.br.
3 Pesquisador. Centro de Filosofia e Ciências Humanas (CFH-UFSC), Florianópolis - SC. E-mail: marcio.andrade@ufsc.br.

Agradecimentos
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq, pela bolsa de mestrado ao primeiro autor, e ao projeto P14 Biogás Itapiranga – Eletrosul/UFSC, pelo apoio financeiro no projeto de mestrado.

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.com

a recuperação e aproveitamento dos nutrientes contidos nestes resíduos, ter-se-á uma fonte alternativa que pode suprir em grande parte a demanda mundial de fertilizantes químicos, em especial a do Brasil, que consome atualmente em torno de 32 milhões de toneladas de fertilizantes por ano, das quais 75% são importadas (FONGARO, 2016).

O biocarvão ou "biochar" vem sendo sugerido como um material e ferramenta para se ter ganhos agronômicos, ao melhorar os atributos edáficos, melhorando a saúde e qualidade do solo e aumentando a produtividade das culturas. Ele pode ser obtido a partir de diferentes matérias-primas, com destaque para os resíduos de agroindústrias, de restaurantes, de estações de tratamento de esgoto, de criação de animais, entre outros, e assim pode-se dar um novo uso a um passivo ambiental. Dessa forma, há também ganhos ambientais e sanitários, ao transformar resíduos em potenciais produtos de valor agregado com segurança sanitária, ao diminuir ou eliminar potenciais riscos com agentes patogênicos, genes resistentes à antibióticos, contaminantes farmacêuticos, pesticidas e metais pesados. É uma das ferramentas para se combater as mudanças climáticas, uma vez que é rico em carbono recalcitrante e serve como sequestro de carbono no solo, além de ajudar na redução de emissão de potenciais GEE, como o óxido nitroso e o dióxido de carbono. Possui uma multifuncionalidade, podendo ser usado também como filtro de água e gases, em substituição ao carvão ativado. Algumas questões ainda precisam ser resolvidas, tais como o custo da tecnologia e a presença de alguns potenciais contaminantes ambientais.

Este trabalho apresenta uma revisão sobre os aspectos gerais do uso do biochar com ênfase nos atributos edáficos, abordando problemáticas globais relacionadas à sustentabilidade e as potencialidades do biochar como produto ou ferramenta para tornar os sistemas de tratamento de resíduos mais sustentáveis.

2 Geração de resíduos: oportunidades para o Biochar

O processamento anaeróbio de biomassa residual em biodigestores além de promover o tratamento de resíduos, através da remoção de carga orgânica, e possibilitar o aproveitamento energético do biogás gerado, permite a utilização do digestato como fertilizante. O Brasil, devido as suas condições climáticas favoráveis, tendo a maior parte do seu território na zona intertropical, e possuidor de farta disponibilidade de biomassa, principalmente residual, apresenta grande potencial para geração de biogás, que é uma fonte de energia renovável promissora e em expansão no país. Porém, essa capacidade é ainda subaproveitada, correspondendo atualmente a apenas 0,05% da matriz energética brasileira e com um potencial para suprir 24% (115 GWh) da demanda de energia elétrica e 44% da demanda por diesel por meio da geração de biogás a partir de resíduos urbanos, da pecuária e da agroindústria (EPE, 2017).

Para a adoção de uma tecnologia de geração de energia renovável a partir do processamento anaeróbio de biomassa, principalmente residual, é recomendável que todo o processo seja sustentável, e a destinação correta dos seus efluentes é parte importante e integrante deste sistema. Apesar deste crescimento e do apelo pela sustentabilidade associado à energia renovável da tecnologia do biogás, ainda não foram plenamente resolvidas as questões ambientais relativas ao aproveitamento dos efluentes dos biodigestores (digestato) para o uso agrícola (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

O digestato é uma biomassa residual resultante da digestão anaeróbia de substrato em reatores, chamados de biodigestores. Estes substratos podem ser oriundos de restos culturais, como a cultura do milho, mas preferencialmente de resíduos de produção como os dejetos de animais (suínos, bovinos, aves, etc), que contém alto poder de produção de biogás, transformando resíduos em matéria-prima. O efluente do biodigestor, contém

alta carga de nutrientes como N, P, K, e é frequentemente utilizado diretamente no solo como fertilizante e condicionador de solo na agricultura (CHAMBERS; TAYLOR, 2013). Devido à alta quantidade de nutrientes e a falta de sanitização adequada do material, a sua aplicação no solo acaba causando problemas ambientais como eutrofização dos cursos da água superficiais, contaminação das águas subterrâneas, dispersão de patógenos e de genes resistentes a antibióticos, entre outros (ITO; GUIMARÃES; AMARAL, 2016). Outra questão que é cada vez mais estudada e ainda não está resolvida é a poluição olfativa, e neste sentido os resíduos orgânicos têm grande impacto por seus odores fortes e desagradáveis, seja no local de processamento, assim como no transporte e na aplicação do material no campo (SILVA; MARQUES, 2004).

É preciso atentar-se também para o fluxo de nutrientes em locais de alta concentração de produção de dejetos animais, uma vez que pode ocorrer a acumulação de nutrientes nos solos acima da capacidade agronômica e dos limites críticos ambientais, gerando impactos ambientais (AITA *et al.,* 2014). Portanto, o transporte desses dejetos ricos em nutrientes para locais com maior demanda é uma questão a ser levada em consideração para a sustentabilidade do sistema. Sendo assim, seria interessante a concentração dos nutrientes desses dejetos em um "produto" que diminua os custos e riscos sanitários do transporte, facilitando a exportação dessa matéria-prima. Este produto pode ser o biochar.

A transformação de resíduos orgânicos rurais e urbanos em biocarvão (biochar) através da pirólise para posterior aplicação no solo vem cada vez mais sendo estudada, especialmente devido o biochar ser um dos principais componentes da "Terra Preta de Índio", um solo antropogênico fértil de regiões amazônicas (LEHMANN; JOSEPH, 2009). O biochar é um material rico em carbono, produzido a partir do processo de pirólise da matéria orgânica, que consiste na queima de biomassa sem a presença de oxigênio, ou de forma limitada a temperaturas geralmente menores que 700ºC (IBI, 2015).

A produção de biochar a partir destes resíduos de animais, assim como os florestais e o lodo municipal de esgoto, podem servir como estratégia para gestão destes resíduos. Parte do biochar derivado deste processo pode ser aplicado no solo, aumentando a sua fertilidade e melhorando suas características físicas, químicas e biológicas. Isso reflete direta e indiretamente no desenvolvimento e rendimento das culturas e, consequentemente, no sequestro de carbono. A outra parte do biochar pode ser adicionada a um sistema de digestão anaeróbica, aumentando a produção de biogás. Essa estratégia permite a integração de produção de energia mais limpa, redução de emissões de GEE e alteração positiva do solo (WANG *et al*., 2018).

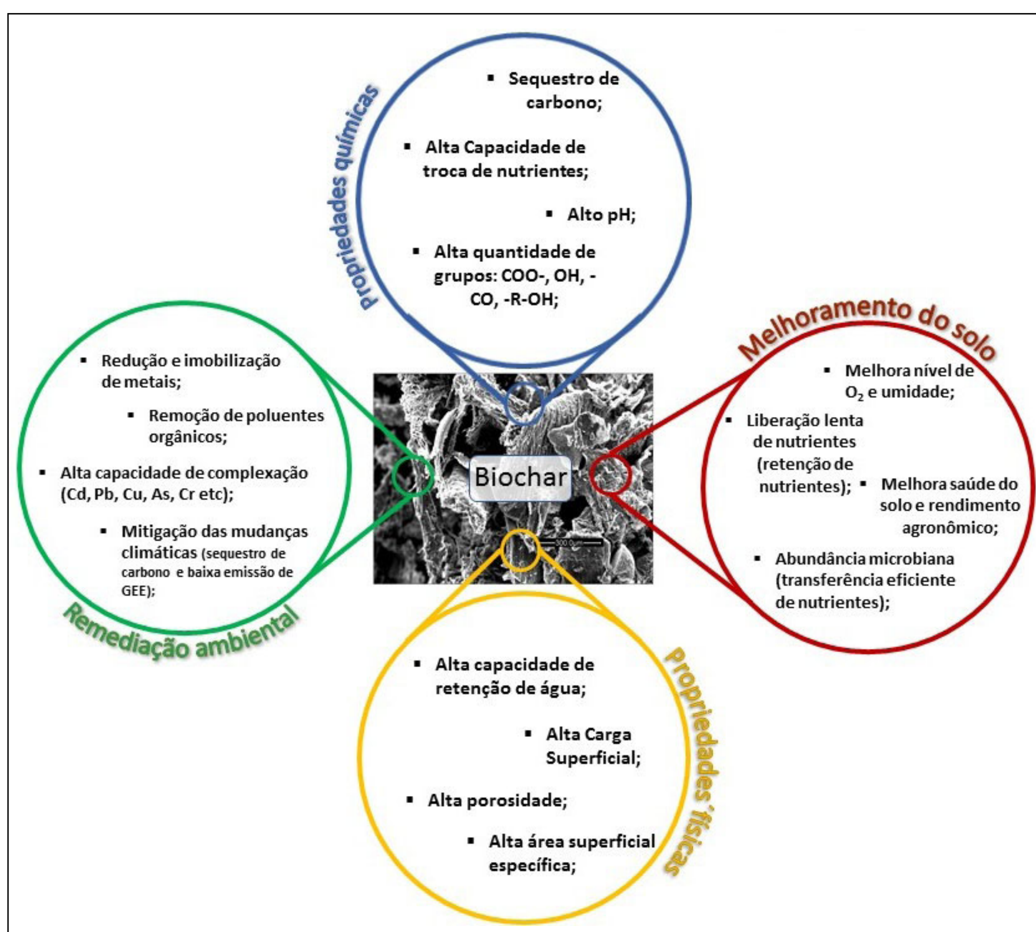
A tecnologia do biochar traz benefícios não só no tratamento de resíduos, mas também no uso como matéria-prima com valor agregado. Em um sistema de gestão de resíduos orgânicos urbanos e rurais, ele ajudaria nas questões ambientais e sanitárias relacionadas ao processamento, armazenamento, transporte e uso dos resíduos para fins agronômicos. Ao pirolisar os resíduos os nutrientes ficam concentrados, há imobilização de metais tóxicos na forma de óxidos e silicatos, não são mais gerados odores desagradáveis no armazenamento, são sanitariamente seguros, facilitando assim o seu transporte e manuseio (PHAM *et al*., 2013).

3 Características do biochar e seus efeitos nos atributos edáficos

As características do biochar dependem geralmente do seu material de origem e do processo de pirólise. Materiais de origem animal, como dejetos, tendem a ter maior pH em comparação àqueles advindos de material vegetal, assim como maior quantidade de nutrientes, como N, P, K, S, Ca, Mg, devido à sua constituição química inicial e maior capacidade de troca catiônica (CTC), porém com menor quantidade de carbono (C)

(SINGH; SINGH; COWIE, 2010). O biocarvão pode ser usado como substituição aos fertilizantes químicos, ou então ser usado como condicionador de solos, especialmente em solos intemperizados e de baixa fertilidade natural (PETTER; MADARI, 2012).

No Brasil, há predomínio de solos ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e baixos teores de matéria orgânica, o que causa menores rendimentos das culturas e maiores gastos com corretivos e fertilizantes. Porém, com o uso do biochar nestes solos, pode-se ter a melhoria dos atributos edáficos em função de suas características físico-químicas. Devido a sua estrutura altamente aromática, possui alta densidade de cargas, com destaque para os grupamentos carboxílicos e fenólicos, assim com alta área superficial especifica e porosidade. Essas características favorecem o sequestro de carbono no solo, aumento da CTC e, consequentemente, redução da emissão de GEE (Figura 1). E assim tem-se o aumento da produtividade das culturas de interesse econômico (PETTER; MADARI, 2012; TRAZZI *et al*., 2018).



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al*. (2017); Lehmann e Joseph (2009).

Figura 1. Características e potencialidades que o biochar apresenta, com ênfase para a melhoria do solo.

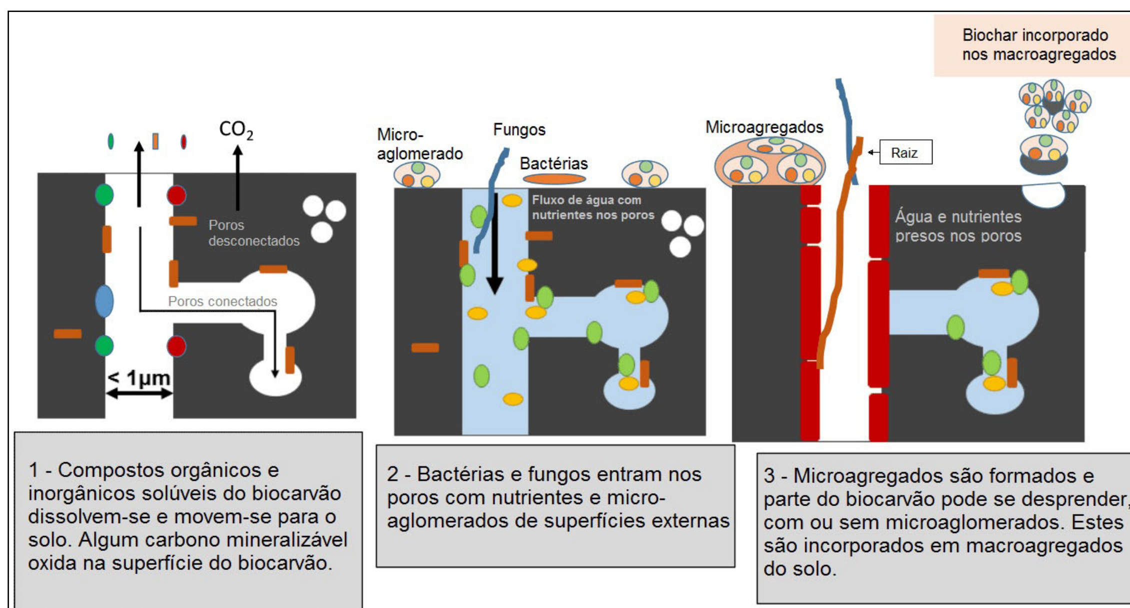
Conforme evidencia-se na Figura 1, a adição de biochar ao solo contribui para a melhoria da saúde do solo, uma vez que limita a mobilidade de metais pesados e agroquímicos no solo, além de melhorar a capacidade de retenção de água e oxigenação do solo. Também é possível melhorar as propriedades químicas do solo, devido a presença de grupos funcionais fenólicos, carboxílicos, hidroxílicos, carbonílicos e quinonas, e ainda potencializar o aumento da quantidade, diversidade e atividade dos microrganismos no solo (SPOKAS *et al* 2009; UCHIMIYA *et al*., 2010; ZHANG *et al*., 2013; BOLAN *et al.,* 2014; GUL *et al*., 2015).

O biochar é um material que pode ter características variadas dependendo do material utilizado e do processo de pirólise, apresentando diversas possibilidades de uso no meio ambiente (AHMAD *et al*., 2014). Apresenta também grande potencial de uso como carvão ativado, especialmente quando feito a partir de material residual, sendo uma alternativa mais sustentável ao carvão ativado tradicional, que utiliza matéria prima de origem fóssil (TAN *et al*., 2017). Ele vem sendo cada vez mais estudado, uma vez que tem capacidade de retirar ou imobilizar poluentes orgânicos e inorgânicos do solo e água (BEESLEY *et al*., 2010).

Um aspecto relevante e em ascensão é a sinergia do biochar com outros elementos. Hale, Luth e Growley, (2015) destacam que um dos maiores desafios tecnológicos e de desenvolvimento industrial é assegurar as taxas de sobrevivência de microrganismos benéficos ao solo e as plantas, como as bactérias promotoras do crescimento vegetal (BPCV). Nesse sentido, tem-se no biocarvão um material carregador de inóculos de BPCV (Figura 2), justamente por sua estrutura porosa (Figura 1 e 3), a qual proporciona espaços para a colonização e proteção contra predadores (IIJIMA *et al*., 2015). Há também estudos indicando a presença de fungos micorrízicos arbusculares em solo tratados com biochar (BUDI; SETYANINGSIH, 2013), o que pode potencializar ainda mais os benefícios para saúde do solo e produtividade de culturas, conforme ilustrado na Figura 1.

O biochar difere-se das cinzas, uma vez que é um material rico em carbono e com uma maior recalcitrância, e as cinzas são geralmente materiais de baixo teor de carbono e presença de minerais resultantes da combustão (LEHMANN; JOSEPH, 2009). No estudo de Rodriguez (2012) foi realizado um experimento com plantas de milho onde foi aplicada ao solo a quantidade de cinzas de 50 g kg^{-1} de solo (tratamento 1) e a mesma quantidade de biochar (tratamento 2), sendo ambos provenientes de madeira. Os resultados mostraram que o uso das cinzas proporcionou um terço do aumento de rendimento do milho em comparação com o rendimento do tratamento com biochar.

O aumento da produção de biomassa das plantas pode ser decorrente de melhorias na parte física, química e biológica do solo (Figura 1). Estudos mostram que o uso do biocarvão no solo favorece a maior capacidade de retenção de água, melhora a estabilidade dos agregados, aumenta porosidade e taxa de infiltração de água (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; VERHEIJEN *et al*., 2010; LIU *et al*., 2016), aumenta o pH e a CTC do solo (LEHMANN *et al*., 2003), fornece nutrientes direta e indiretamente para as plantas (CHAN *et al*., 2008), melhora a saturação por bases (SCHULZ; GLASER, 2012), a disponibilidade de P (YAMATO *et al*., 2006), além de favorecer as interações do solo com a microfauna (RUIVO *et al*., 2009). A Figura 2 demonstra algumas relações físicas, químicas e biológicas no biochar com o seu envelhecimento no solo, especialmente com relação à porosidade.

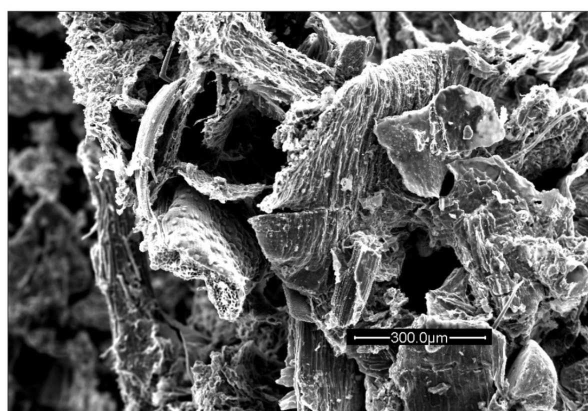


Fonte: Adaptado de https://biochar.international/guides/properties-fresh-aged-biochar/ (acessado em 25/07/2019)

Figura 2. Principais alterações decorrentes do envelhecimento do biochar quando aplicado no solo.

A incorporação do biochar nos macroagregados (Figura 2) aumenta a coesão interna dos agregados resultante das ligações entre as partículas minerais e o carbono recalcitrante do biochar. E isso reflete em melhorias na estabilidade dos agregados de solos manejados com o uso de biochar (SUN; LU, 2014).

Em relação ao aumento do rendimento de culturas com o uso de biochar, Chan *et al.* (2008) avaliaram a aplicação de diferentes doses biochar proveniente de cama de aviário em solo de baixa fertilidade (Argissolo) para a produção de rabanete. Quatro doses de biocarvão (0, 10, 25 e 50 t/ha) foram investigadas, com os resultados mostrando aumentos no rendimento de matéria seca do rabanete. Na menor dose (10 t/ha) houve um aumento no rendimento de 42% e na maior dose (50 t/ha), verificaram-se aumentos de 96% se comparado ao controle. Os aumentos de produtividade podem ser atribuídos, em grande parte, à capacidade desses biocarvões de aumentar a disponibilidade de N. Somado a isso, o biochar aumenta a CTC do solo e melhora na parte física do solo, sendo isso diretamente associado a sua elevada porosidade. Na Figura 3 observa-se a macroporosidade do biochar proveniente de dejeto de aves, resultado de uma pirólise lenta.



Fonte: Lehmann e Joseph (2009).

Figura 3. Macroporosidade de biochar proveniente de dejeto de aves.

A porosidade do biochar é que determina sua área superficial. A distribuição de poros é muito variável e engloba, de acordo com o seu diâmetro interno, nanoporos (<0.9 nm), microporos (<12 nm) a macroporos (>50 nm) (LEHMANN; JOSEPH. 2009). A natureza altamente porosa e elevada área superficial interna do biochar juntamente com sua capacidade de adsorver a matéria orgânica solúvel e outros nutrientes inorgânicos, também é responsável por proporcionar um habitat favorável para os microrganismos (LEHMANN *et al.,* 2011), quando adicionado ao solo, conforme evidencia-se na Figura 2.

Os efeitos no solo, porém, variam conforme as características de cada solo, assim como das propriedades do biochar. Vários estudos relataram o potencial do biochar na melhoria da capacidade de retenção de água no solo. Na Tabela 1 verifica-se uma síntese dos principais resultados de alguns estudos que testaram o efeito do biochar na capacidade de retenção de água de solos com diferentes texturas. Além disso, na Tabela 1 é possível observar os diferentes tipos de biochar, provenientes de diferentes materiais de origem e as diferentes taxas de aplicação no solo.

Tabela 1. Efeito do biochar na capacidade de retenção de água no solo (CRA) sob diferentes classes texturais e condições experimentais.

Referência	Material de produção do biochar	ASE	Taxa[(1)]	Textura	Local	CRA
		m^2g^{-1}	% (peso/peso)			
Abel et al. (2013)	Milho, silagem de milho, madeira de faia	nd	1; 2,5; 5	argiloarenosa	C/L	+
Asai et al. (2009)	Madeira	nd	0,3; 0,6; 1,2	argiloarenosa	L	+
Basso et al. (2013)	Carvalho vermelho	nd	3; 6	francoarenosa	L	+
Brewer et al. (2012)	Palha de milho	4,5-8,5	0,5	areia franca	L	0
Brockhoff et al. (2010)	Panicum virgatum	21,6	5; 10; 15; 20; 25	areia	L	+
Chen, Shinogi e Taira (2010)	Bagaço de cana e efluente agrícola	nd	3; 1	muito argilosa	C	+
Dempster, Jones e Murphy (2012)	Eucalyptus	273	1,8	areia	L	+
Devereux, Sturrock e Mooney (2012)	Madeira	nd	1,5; 2,5; 5	areia franca	L	+
Fellet et al. (2011)	Resíduos de poda	141	1; 5; 10	argilosa	L	+
Ibrahim et al. (2013)	Madeira	nd	0,5; 1; 1,5; 2	francoarenosa	L	+
Jones, Haynes e Phillips (2010)	Resíduos verdes	nd	2,4; 4,6	areia	L	+
Karhu et al. (2011)	Madeira de lei	3,6	0,3	francossiltosa	C	0
Laird et al. (2010)	Madeira	130-153	0,5; 1; 2	francoargilosa	L	+
Lei; Zhang, (2013)	Dejetos bovinos e maravalha	14-124	5	franca	L	+
Liu et al. (2012)	Resíduos comerciais	nd	0,3; 0,6; 1,2[(2)]	areia franca	C	+
Pereira et al. (2012)	Madeira	nd	6; 12; 24	areia	L	+
Ulyett et al. (2014)	Madeira	nd	3	francoarenosa	L	+
Uzoma et al. (2011)	Dejetos de vaca	nd	0,4; 0,7; 0.9	areia	C	+
Zheng et al. (2013)	Gramíneas	2,84	1; 2; 5	francossiltosa	L	+

Fonte: Adaptado de Novotny *et al*. (2015). ASE: área superficial específica do biocarvão; L: laboratório; C: condições de campo; - e +: efeito negativo e positivo do biocarvão, respectivamente; 0: sem efeito; nd: não determinado. (1) Todos os estudos incluíram um tratamento controle - solo sem biochar. (2) Taxa de aplicação de biochar transformada em massa seca (p/p) considerando uma densidade do solo de 1,3 kg dm^{-3} para solos argilosos e siltosos; e 1,6 kg dm^{-3} para solos arenosos em profundidade de 10 cm (quando não especificado).

Em solos arenosos, os efeitos positivos foram observados em quase todos os estudos, enquanto em solos argilosos os efeitos neutros (zero) foram relatados com maior frequência. Os efeitos positivos foram geralmente relacionados à alta área superficial específica devido à estrutura porosa do biochar (Figura 3) que favorece a retenção de água no solo (Tabela 1).

Em relação aos riscos biológicos, resíduos orgânicos rurais contém patógenos e precisam de uma higienização adequada para sua utilização no ambiente (FONGARO, 2016). No estudo realizado por Zhou *et al*. (2019), os autores investigaram a redução da disseminação de genes de resistência a antibióticos (ARGs) e elementos genéticos móveis (MGEs) de biocarvão de dejetos suínos compostado em comparação com o processo de compostagem. O resultado mostrou que os solos tratados com biochar apresentaram presença significativamente menor de ARGs e MGEs em comparação aos solos com composto proveniente de compostagem, mostrando que a disseminação de ARGs de resíduos animais para o meio ambiente pode ser efetivamente mitigada pela conversão de dejetos de suínos em biocarvão. O total de ARGs nos solos tratados com biocarvão foi inclusive semelhante à dos solos controle durante o cultivo.

Além dos genes, a co-compostagem de digestato ou resíduos orgânicos com biochar leva a uma diminuição nas emissões de CH_4 e N_2O em comparação com a compostagem de dejetos (VU *et al*., 2015), além de aumentar a produtividade das culturas. Glaser *et al.* (2015) verificaram que a adição de 10 Mg ha^{-1} de biochar no composto levou a um aumento de 26% na produtividade de milho quando comparado ao composto puro.

Outros benefícios do processo de pirólise para produção do biochar estão na eliminação de pesticidas, contaminantes químicos farmacêuticos e outros orgânicos, e a remoção de sementes de ervas daninhas e microrganismos indesejados nos resíduos, tais como patógenos humanos e vegetais (NAVIA; CROWLEY, 2010).

Há estudos que associam a aplicação de biochar a um melhor desenvolvimento de microrganismos do solo, assim como de raízes (ATKINSON; FITZGERALD; HIPPS, 2010) e como os biocarvões em geral são mais resistente à degradação microbiana, essas qualidades podem persistir por um longo tempo (SOHI *et al.,* 2010). Entretanto, podem ocorrer efeitos negativos, sendo essa relação entre a atividade microbiana, processos biológicos e mudanças nas propriedades químicas e físicas do solo ainda em processo de estudo (ABUJABHAH *et al*., 2016).

As propriedades químicas e microbiológicas da aplicação de diferentes doses de biocarvão produzido a partir de excrementos de aves em solos foram avaliadas por Dominchin *et al*. (2019). Os autores selecionaram três locais com diferentes intensidades de uso: solo florestal sem interferência antrópica (SF), solo agrícola sob manejo sustentável (MS) e solo agrícola sob lavoura intensiva (LI). O biocarvão foi aplicado no solo em quatro doses: sem biocarvão (controle 0%) e com biocarvão nas doses de 1% (peso biochar/peso solo), 3% e 10%. A aplicação de biochar aumentou o pH, a condutividade elétrica (CE), o carbono orgânico total (COT) e a relação C/N. Altas concentrações de biochar causaram um aumento na atividade hidrolisante do diacetato de fluoresceína (FDA) em solos agrícolas, sugerindo um aumento na atividade microbiana total. No entanto, a aplicação do biocarvão produziu uma redução na atividade da desidrogenase, principalmente no solo com MS e no solo com LI. Foi observado um aumento de actinobactérias e fungos micorrízicos em solos tratados com altas doses dos substratos. A aplicação de biocarvão aumentou a abundância de bactérias gram-negativas em comparação com o tratamento controle (sem biocarvão). Aumentos significativos nos ácidos graxos fosfolipídicos totais foram detectados após a aplicação do biochar em SF e LI, indicando um aumento na biomassa microbiana total.

Em relação a doenças em plantas, Carvalho *et al*. (2013) identificaram uma redução da infestação da brusone do arroz com a utilização de biochar de madeira.

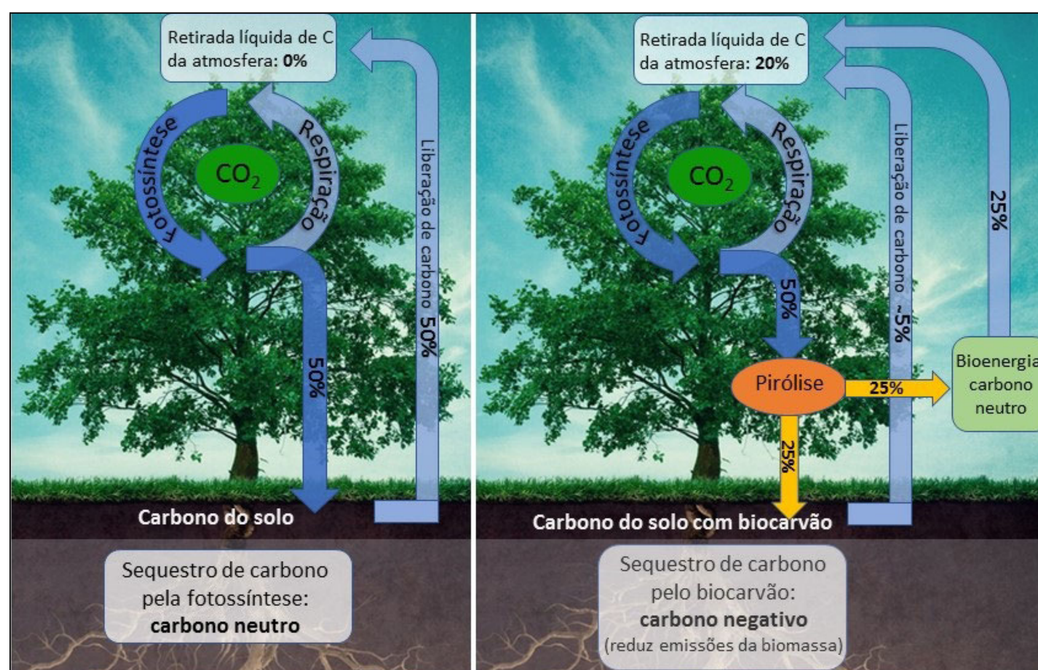
Elad *et al*. (2010, 2011) e Harel *et al*. (2012) relataram efeitos positivos do biocarvão na diminuição de infecções fúngicas foliares de tomate, pimenta e morango, indicando assim que a aplicação de biochar ao solo pode ser benéfica, trazendo um maior poder de resposta das plantas às doença.

3.1 Biochar e mudanças climáticas: Gases de Efeito Estufa-GEE

A aplicação de biocarvão no solo é proposta como um mecanismo de sequestro de carbono, tendo sido inclusa pela primeira vez em relatório do Painel Governamental Sobre Mudança do Clima (IPCC) como uma promissora tecnologia de emissão negativa de carbono (Figura 4), ou seja, tecnologias que resultam na remoção líquida de CO_2-$C_{equivalente}$ (CO_2-C_e) da atmosfera (IPCC, 2018). Sua aplicação gera ainda aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo e fonte de energia e nutrientes para a biota do solo. Na avaliação do potencial sequestro de carbono pelo biocarvão, vários efeitos indiretos de sua aplicação também devem ser levados em conta, tais como o balanço do uso de fertilizantes, as emissões de N_2O e CH_4, e o aumento de produtividade (LIBRA *et al*., 2011). Ao aplicar o biochar no solo ao invés de resíduos orgânicos mais lábeis, espera-se evitar a emissão de carbono em forma de GEE, sendo este carbono armazenado no solo em formas mais estáveis, comparado com a deposição destes resíduos diretamente ao solo (MADARI *et al*., 2006).

Schouten *et al.* (2012) analisaram as emissões de C no solo (na forma de C-CO_2 via respiração dos microrganismos) após a incubação com diferentes materiais em um solo arenoso em condições de laboratório. A adição de esterco bovino causou as maiores emissões de CO_2, (32%), seguido de digestato (18%) e do biocarvão, com as menores emissões (7%). As emissões de CO_2 do solo com biochar se estabilizaram após 40 dias da incubação, enquanto o solo incubado com digestato e esterco continuaram liberando CO_2, mostrando uma maior estabilidade no solo do C do biochar.

Woolf *et al*. (2010) estimaram o potencial de mitigação das mudanças climáticas do biochar com a redução líquida de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso em 1,8 Gt CO_2-C_e anuais (de um total de 15.4 Pg CO_2-C_e) e 130 Gt CO_2-C_e no século, sem comprometer a conservação do solo, habitat e segurança alimentar. Comparou-se também o potencial de mitigação do biochar em relação à combustão da mesma biomassa obtida sustentavelmente para geração de energia e chegou-se a um potencial de 12% de mitigação do biochar e de 10% da combustão, exceto em áreas com solos férteis em que essa mesma biomassa é usada como combustível.



Fonte: Adaptado de Lehmann (2007).

Figura 4. Ciclo do carbono e sequestro de carbono pelo uso do biocarvão.

O carbono resultante da decomposição natural da biomassa de plantas é mais lábil voltando para atmosfera mais rapidamente, já o carbono do biocarvão é mais estável, podendo então ser sequestrado no solo e inserindo este carbono em um ciclo mais lento de liberação de carbono (LEHMANN, 2007). Este autor estimou que cerca de 10% das emissões anuais de combustíveis fósseis dos EUA poderia ser sequestrado, utizando três abordagens diferentes com o uso do biochar: 1) pirólise de resíduos florestais da produção de madeira; 2) pirólise de vegetação de crescimento rápida cultivada em terra ociosas e 3) pirólise de resíduos de culturas. Nestas três estratégias, o biochar foi adicionado ao solo, estocando assim carbono, havendo ainda um potencial maior caso os gases resultantes da pirólise também fossem utilizados na produção de energia. Portanto, conforme evidencia-se na Figura 4, combinando-se a produção bioenergética com a captação dos gases produzidos durante a pirólise, o biocarvão é uma tecnologia limpa para sequestro de carbono, sendo muito atrativo para subsídios à produção energética e para a sua inclusão no mercado global de créditos de carbono.

Se adicionado ao solo, o biochar pode reduzir as emissões de carbono entre 12 e 84% das empresas geradoras de bioenergia, tornando estas industrias de carbono negativo e não somente carbono neutro. Além disso, este biochar pode ser misturado com adubos ou fertilizantes e também adicionado nos sistemas conservacionistas de uso do solo, a exemplo do sistema plantio direto, inserindo-se nos locais de produção já existentes, aumentando ainda mais o sequestro de carbono destes sistemas (LEHMANN, 2007). Lehmann *et al*. (2006) estimaram que até 12 % da emissão de C antrópico causada por mudanças no uso das terras poderia ser eliminada se, ao invés de queimada, a biomassa fosse transformada em carvão e usada para outros fins, como o agronômico.

Uma vez que o biochar tem características diferentes de acordo com o tipo de material e a forma como foi feito, sua capacidade de estocar carbono ainda é objeto de estudo, assim como as taxas aplicadas e seus efeitos nos diferentes tipos de solos.

Zhang *et al*. (2012) observaram redução de emissões de N_2O (com maior potencial de GEE) para aplicações até 40 t/ha, entretanto nesta taxa de aplicação as emissões de CO_2 foram maiores que o controle. Quando considerada uma aplicação de biochar

entre 10 a 100 ton/ha, de concentração de carbono entre 50 e 78%, e assumindo-se 1411 milhões de hectares de terras cultivadas globalmente, a capacidade de estoque de carbono através do biochar seria entre 7 e 110 Gt (OLIVEIRA *et al*., 2017). O sequestro de 500 milhões de toneladas de CO_2/ano poderia ser alcançado com uma produção anual de 339,4 de toneladas de biochar, o que Windeatt *et al*. (2014) estimaram ser equivalente a 1,5% das emissões anuais de CO_2 global.

O aumento da produtividade das culturas causada pela aplicação do biochar no solo poderia reduzir a quantidade de terras necessárias para a produção, reduzindo assim as emissões indiretas de GEE decorrentes do uso da terra (KAUFFMAN *et al*., 2014). Estima-se que mais de dois terços das emissões totais de óxido nitroso (N_2O) são originados dos solos, e esta emissão está diretamente associada ao uso extensivo de fertilizantes nitrogenados na agricultura (CAYUELA *et al*., 2014). O biochar pode servir como uma estratégia para diminuir estas emissões, como observado em metanálise realizada por Borchard *et al*. (2019). Estes autores encontraram uma redução geral de emissões de N_2O pela aplicação de biochar no solo de 38%, enquanto a lixiviação de NO_3^- foi reduzida em 13% com o biochar, apresentando maiores reduções de lixiviação (>26%) com experimentos mais longos (ou seja, >30 dias). O biochar apresentou forte efeito na redução de emissão de N_2O em Anthrosol (solos antropogênicos) e Arenosols (solos arenosos). Por meio da metanálise verificou-se que o uso de biochar reduziu as emissões de N_2O e a lixiviação de NO_3^- em agricultura e horticultura, mas teve um efeito limitante nas perdas em pastagens e culturas perenes.

3.2 Desafios da tecnologia do biochar

Um dos desafios da tecnologia do biochar é a presença de alta quantidade de Al, Na e Cu, devido à alimentação dos animais, podendo, em altas quantidades, ser potencialmente prejudicial ao uso agrícola com culturas de interesse econômico (SINGH; SINGH; COWIE, 2010). Outro aspecto a ser considerado no processo de pirólise, é a quantidade de compostos aromáticos presentes no biocarvão. O estudo de Dempster *et al.* (2012) apontou um possível efeito tóxico do biochar na biomassa microbiana do solo devido a seus hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e algumas substâncias compostas orgânicas voláteis. Em relação à riscos à saúde, Hale *et al*. (2012), verificaram que a maioria dos níveis de HPAs e dioxinas totais e biodisponíveis nos biochars de pirólise lenta estavam abaixo das diretrizes ambientais europeias para os níveis de toxinas nos solos, no entanto as concentrações para o biochar de gaseificação estavam acima desses níveis seguros.

Em relação aos custos para a produção do biochar, como sua produção no país é incipiente e os processos de pirólise para esse fim não são amplamente aplicados no mercado, a análise do custo para produção de biochar, considerando toda a cadeia de custos está em estágio de desenvolvimento. Os custos relacionados à pirólise do material e a construção do equipamento ainda são objeto de estudo. Há poucos estudos que realizam uma avaliação abrangente dos custos no ciclo de vida do sistema energético baseado em biochar e que considere cada etapa do ciclo de produção e uso. Homagain *et al*. (2016) ligam a viabilidade econômica do sistema de produção de bioenergia baseado em biochar, no Canadá, aos custos de pirólise, processamento de matéria-prima (secagem, moagem e peletização), coleta e transporte e valor de compensação total de carbono fornecida pelo sistema. Entretanto, ganhos nos sistemas de produção agrícola geralmente não são levados em consideração nos estudos econômicos e de ciclo de vida dos sistemas para produção de biochar, sendo necessário incluir este aspecto nos estudos para se ter uma avaliação mais fidedigna.

3.3 Multifuncionalidade do biochar

O biocarvão ainda tem potencialidade como um material com multifuncionalidades. Usado como filtro, tem diversas vantagens em comparação com outros métodos de baixo custo existentes (filtro de areia, ebulição, desinfecção solar, cloração), tais como: é um adsorvente de baixo custo e renovável feito usando biomateriais e com material de fácil acesso e prontamente disponível, tornando-o apropriado à comunidades pobres; os métodos existentes eliminam predominantemente patógenos, porém os biocarvões removem contaminantes químicos, biológicos e físicos; eles mantêm as propriedades da água, enquanto os métodos existentes, podem, por exemplo, aumentar as concentrações de contaminantes químicos (por exemplo, ferver a água) (GWENZI *et al.*, 2017).

Biocarvões de dejetos de suínos e lodo de esgoto mostraram boa remoção de H_2S de biogás, sendo assim substitutos viáveis e mais baratos que o carvão ativado (XU *et al.*, 2014). Pode-se também adicionar biochar dentro de reator anaeróbio afim de reduzir o enxofre no biogás sem comprometer a geração de metano (CHOUDHURY; LANSING, 2020), sendo ainda um material interessante por transformar um resíduo da produção em um material de valor agregado usado no próprio sistema. Alguns biocarvões adicionados a biodigestores anaeróbios podem contribuir para o aumento na produção de metano (GIWA *et al*, 2019), sendo uma ferramenta interessante de gestão de resíduos de setores agrícolas e urbanos. Pode ser usado também como material protetor de sementes em locais de reflorestamento como as "seedballs", funcionando como capa protetora da semente contra animais e insetos, e na estação chuvosa são permeáveis o suficiente para que a semente possa germinar (GRAVES *et al.*, 2013).

Considerações finais

O biochar é uma ferramenta importante para melhorar a gestão de resíduos, pois permite eliminar ou diminuir o risco sanitário inerente ao manejo desses resíduos. Ao ser integrado à sistemas de geração de energia, como os biodigestores produtores de biogás, pode potencializar a produção deste gás, tornando o sistema mais sustentável e ao mesmo tempo que diminui problemas de gerenciamento dos resíduos, pode potencializar a produção das culturas, melhorar a saúde do solo e sequestrar carbono no solo, contribuindo assim para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Além disso, o biochar pode contribuir não só para o estoque de carbono direto no solo, mas evitar a emissão de outros gases de efeito estufa, como o óxido nitroso, que tem potencial danoso maior que o gás carbônico.

Por seu potencial em aumentar a capacidade de troca catiônica dos solos, a retenção de água, a formação de macroagregados, está intimamente associado com a recuperação e melhoria da saúde de solos, mitigaçao das mudanças climáticas e aumento da produtividade das culturas. Pode ainda servir para diminuição das contaminações ambientais por poluentes orgânicos e inorgânicos, microrganismos patogênicos, metais pesados, pesticidas e contaminantes farmacêuticos, além de ter propriedades promissoras como filtro de água e gases, sendo um produto com multifuncionalidade de aplicação e que pode ajudar a tornar os sistemas de produção mais sustentáveis.

Os custos da tecnologia do biocarvão ainda precisam ser melhor estudados, e é importante que os estudos englobem também os potenciais ganhos ou perdas na sustentabilidade dos sistemas, para assim se obter valores mais fundamentados para a adoção desta tecnologia. Riscos ambientais como a concentração de alguns potenciais contaminantes no biochar ao aplicá-lo no solo precisam ser levados em consideração,

a correta gestão dos gases resultantes da pirólise, assim como a segurança do processo para os trabalhadores, para que a tecnologia seja na prática sustentável.

Portanto, o biochar tem grande potencial de aplicação, por ajudar na sustentabilidade de desafios globais, por sua multifuncionalidade de usos, característica variada, podendo ser produzido de acordo com a finalidade que será utilizado, ter segurança sanitária, ser mitigador de gases de efeito estufa e por ser uma boa ferramenta para gestão de resíduos orgânicos. O biocarvão é um meio para resolver potenciais problemas que enfrentamos, contudo não vem para resolver todos os problemas, uma vez que a maior parte destes problemas são causados pela insustentabilidade do modo como produzimos, consumimos e lidamos com nossos os resíduos. Se a tecnologia vier acompanhada de uma perspectiva de mudança, tornando os sistemas mais sustentáveis, ela é um produto e uma ferramenta interessante, caso contrário será só mais uma tecnologia que tratará dos sintomas sem serem resolvidas as causas do problema.

Referências

ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M.; WESSOLEK, G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202, p. 183-191, 2013.

ABUJABHAH, I. S.; DOYLE, R.; BOUND, S. A.; BOWMAN, J. P. The effect of biochar loading rates on soil fertility, soil biomass, potential nitrification, and soil community metabolic profiles in three different soils. **Journal of soils and sediments**, v. 16, n. 9, p. 2211-2222, 2016.

AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; PUJOL, S. B.; NICOLOSO, R. S.; CORRÊA, J. C. Aproveitamento dos dejetos de suínos e bovinos como fertilizantes: impactos ambientais e estratégias de mitigação. In: PALHARES, J. C. P.; GLEBER, L. (Ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. v. 2, p. 199-282.

AHMAD, M., RAJAPAKSHA, A. U., LIM, J. E., ZHANG, M., BOLAN, N., MOHAN, D. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p.19-33, 2014.

ASAI, H.; SAMSON, B. K.; STEPHAN, H. M.; SONGYIKHANGSUTHOR, K.; HOMMA, K.; KIYONO, Y.; INOUE, Y.; SHIRAIWA, T.; HORIE, T. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. **Field crops research**, v. 111, p. 81-84, 2009.

ATKINSON, C. J.; FITZGERALD, J. D.; HIPPS, N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and soil**, v. 337, p. 1-18, 2010.

BASSO, A. S.; MIGUEZ, F. E.; LAIRD, D. A.; HORTON, R.; WESTGATE, M. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. **Gcb Bioenergy**, v. 5, p. 132-143, 2013.

BEESLEY, Luke; MORENO-JIMÉNEZ, E.; GOMEZ-EYLES, J.L. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. **Environmental pollution**, v. 158, n. 6, p. 2282-2287, 2010.

BORCHARD, N.; SCHIRRMANN, M.; CAYUELA, M. L.; KAMMANN, C.; WRAGE-MÖNNIG, N.; ESTAVILLO, J. M.; FUERTES-MENDIZÁBAL, T.; SIGUA, G.; SPOKAS, K.; IPPOLITO, J. A.; NOVAK, J. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N2O emissions: a meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2354-2364, 2019.

BOLAN, N.; KUNHIKRISHNAN, A.; THANGARAJAN, R.; KUMPIENE, J.; PARK, J.; MAKINO, T.; KIRKHAM, M. B.; SCHECKEL, K. Remediation of heavy metal (loid) s contaminated soils–to mobilize or to immobilize?. **Journal of hazardous materials**, v. 266, p. 141-166, 2014.

BUDI, S. W.; SETYANINGSIH, L. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improved early growth of neem (Melia azedarach Linn.) seedling under greenhouse conditions.

Journal Manajemen Hutan Tropika, v. 19, n. 2, p. 103-110, 2013.
BREWER, C. E.; HU, Y. Y.; SCHMIDT-ROHR, K.; LOYNACHAN, T. E.; LAIRD, D. A.; BROWN, R. C. Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. **Journal of environmental quality**, v. 41, p. 1115-1122, 2012.
BROCKHOFF, S. R.; CHRISTIANS, N. E.; KILLORN, R. J.; HORTON, R.; DAVIS, D. D. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. **Agronomy Journal**, v. 102, p. 1627-1631, 2010.
CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E.; BASTIAANS, L.; VAN OORT, P. A. J.; HEINEMANN, A. B.; DA SILVA, M. A. S.; MAIA, A. H. N.; MEINKE, H. Biochar improves fertility of a clay soil in the Brazilian Savannah: short term effects and impact on rice yield. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)**, v. 114, p. 101-107, 2013.
CAYUELA, M. L.; CAYUELA, M. L.; VAN ZWIETEN, L.; SINGH, B. P.; JEFFERY, S.; ROIG, A.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A. Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 191, p. 5-16, 2014.
CHAMBERS, B. J.; TAYLOR, M. The use of digestate as a substitute for manufactured fertilizer. In: KORRES, N.; O'KIELY, P.; BENZIE, J. A. H.; WEST, J. S. **Bioenergy production by anaerobic digestion:** using agricultural biomass and organic wastes. Routledge, 2013. p. 389-404.
CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Using poultry litter biochars as soil amendments. **Soil Research**, v. 46, n. 5, p. 437-444, 2008.
CHEN, Y.; SHINOGI, Y.; TAIRA, M. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. **Soil Research**, v. 48, p. 526-530, 2010.
CHOUDHURY, A.; LANSING, S. Biochar addition with Fe-impregnation to reduce H2S production from anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, p. 123121, 2020.
DEMPSTER, D. N.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V. Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. **Soil Research**, v. 50, p. 216-221, 2012.
DEMPSTER, D. N.; GLEESON, D. B.; SOLAIMAN, Z. I.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. **Plant and Soil**, v. 354, p. 311-324, 2012.
DEVEREUX, R. C.; STURROCK, C. J.; MOONEY, S. J. The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. **Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 103, p. 13-18, 2012.
DOMINCHIN, M. F.; VERDENELLI, R. A.; VARGAS GIL, S.; AOKI, A. M.; MARIN, R. H.; MERILES, J. M. Efecto de la aplicación de biochar avícola sobre las propiedades químicas y microbiológicas de una suelo Haplustol típico con diferentes intensidades de uso. **Ciencia del Suelo**, 2019.
ELAD, Y.; CYTRYN, E.; HAREL, Y. M.; LEW, B.; GRABER, E. R. The biochar effect: plant resistance to biotic stresses. **Phytopathologia Mediterranea**, v. 50, p. 335-349, 2011.
ELAD, Y.; DAVID, D. R.; HAREL, Y. M.; BORENSHTEIN, M.; KALIFA, H. B.; SILBER, A.; GRABER, E. R. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. **Phytopathology**, v. 100, p. 913-921, 2010.
EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Impactos da participação do biogás e biometano na matriz energética**, São Paulo, 2017. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf#search=biog%C3%A1s. Acesso em: 28 jul. 2019.
FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS. **The State of Food and Agriculture 2018. Migration, agriculture and rural development**. Rome, 2018.
FELLET, G.; MARCHIOL, L.; DELLE VEDOVE, G.; PERESSOTTI, A. Application of biochar on

mine tailings: effects and perspectives for land reclamation. **Chemosphere**, v. 83, p. 1262-1267, 2011.

FONGARO, G. **A higienização de dejetos suinícolas visando reciclo agrícola sanitariamente seguro.** 2016. 244 f. Tese (Doutorado) - Programa de Biotecnologia e Biociência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

GIWA, A. S.; XU, H.; CHANG, F.; WU, J.; LI, Y.; ALI, N.; DING, S.; WANG, K. Effect of biochar on reactor performance and methane generation during the anaerobic digestion of food waste treatment at long-run operations. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 103067, 2019.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal–a review. **Biology and fertility of soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

GLASER, B.; WIEDNER, K.; SEELIG, S.; SCHMIDT, H. P.; GERBER, H. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, p. 667-678, 2015.

GRAVES, D.; MYCORRHIZAS, N.; MOTUEKA, A.; ZEALAND, N**. Biochar and Soil Mix in Geo-Textile Bags Offers Improved Methods To Collect and Propagate Mycorrhizal Fungal Inocula**. 2013. Disponivel em: https://www.researchgate.net/publication/245536059. Acesso em: 28 jul. 2019.

GUL, S.; WHALEN, J. K.; THOMAS, B. W.; SACHDEVA, V.; DENG, H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems & Environment,** v. 206, p. 46-59, 2015.

GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; NOUBACTEP, C.; MUKOME, F. N. Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. **Journal of environmental management**, v. 197, p. 732-749, 2017.

HALE, L.; LUTH, M.; CROWLEY, D. Biochar characteristics relate to its utility as an alternative soil inoculum carrier to peat and vermiculite**. Soil Biology and Biochemistry**, v. 81, p. 228-235, 2015.

HALE, S. E.; LEHMANN, J.; RUTHERFORD, D.; ZIMMERMAN, A. R.; BACHMANN, R. T.; SHITUMBANUMA, V.; O'TOOLE, A.; SUNDQVIST, K. L.; HARP, H. P. H.; CORNELISSEN, G. Quantifying the total and bioavailable polycyclic aromatic hydrocarbons and dioxins in biochars. **Environmental science & technology**, v. 46, p. 2830-2838, 2012.

HAREL, Y. M.; ELAD, Y.; RAV-DAVID, D.; BORENSTEIN, M.; SHULCHANI, R.; LEW, B.; GRABER, E. R. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. **Plant and Soil**, v. 357, p. 245-257, 2012.

HOMAGAIN, K.; SHAHI, C.; LUCKAI, N.; SHARMA, M. Life cycle cost and economic assessment of biochar-based bioenergy production and biochar land application in Northwestern Ontario, Canada. **Forest Ecosystems**, v. 3, p. 21, 2016.

IBI-INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**: versão 2.1. IBI, 2015.

IBRAHIM, H. M.; AL-WABEL, M. I.; USMAN, A. R.; AL-OMRAN, A. Effect of Conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil. **Soil science**, v. 178, p. 165-173, 2013.

IIJIMA, M.; YAMANE, K.; IZUMI, Y.; DAIMON, H.; MOTONAGA, T. Continuous application of biochar inoculated with root nodule bacteria to subsoil enhances yield of soybean by the nodulation control using crack fertilization technique. **Plant Production Science**, v. 18, n. 2, p. 197-208, 2015.

IPCC-PAINEL GOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN,

Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (eds.). **Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. 2018 Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf. Acesso em: 30 jul. 2019.

ITO, M.; GUIMARÃES, D.; AMARAL, G. Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. **Agroindústria BNDES Setorial,** n. 44, p. 125-156, 2016. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9974/2/BS%2044%20Impactos%20ambientais%20da%20suinocultura_P.pdf. Acesso em: 28 jul. 2019.

JONES, B. E. H.; HAYNES, R. J.; PHILLIPS, I. R. Effect of amendment of bauxite processing sand with organic materials on its chemical, physical and microbial properties. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 2281-2288, 2010.

KAUFFMAN, N.; DUMORTIER, J.; HAYES, D. J.; BROWN, R. C.; LAIRD, D. A.; Producing energy while sequestering carbon? The relationship between biochar and agricultural productivity. **Biomass and Bioenergy,** v. 63, p. 167-176, 2014.

KARHU, K.; MATTILA, T.; BERGSTRÖM, I.; REGINA, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH4 uptake and water holding capacity–Results from a short-term pilot field study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, p. 309-313, 2011.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia, SC: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. p. 95.

LAGHARI, M.; NAIDU, R.; XIAO, B.; HU, Z.; MIRJAT, M. S.; HU, M.; KANDHRO, M. N.; CHEN, Z.; GUO, D.; JOGI, Q.; ABUDI, Z. N.; FAZAL, S. Recent developments in biochar as an effective tool for agricultural soil management: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, p. 4840-4849, 2016.

LAIRD, D. A.; FLEMING, P.; DAVIS, D. D.; HORTON, R.; WANG, B.; KARLEN, D. L. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, p. 443-449, 2010.

LAWRINENKO, M.; LAIRD, D. A. Anion exchange capacity of biochar. **Green Chemistry**, v. 17, n. 9, p. 4628-4636, 2015.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management:** science, technology and implementation. Londres, Reino Unido: Earthscan, 2009.

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, v. 447, n. 7141, p. 143-144, 2007.

LEHMANN, J.; GAUNT, J. RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems–a review. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 11, n. 2, p. 403-427, 2006.

LEHMANN, J.; RILLIG, M.C.; THIES, J.; MASIELLO, C.A.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D. Biochar effects on soil biota-a review. **Soil Biol. Biochem**. n. 43, p. 1812-1836, 2011.

LEHMANN, J.; SILVA JUNIOR. J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; CLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant Soil**. n. 249, p. 343-357, 2003.

LEI, O.; ZHANG, R. Effects of biochars derived from different feedstocks and pyrolysis temperatures on soil physical and hydraulic properties. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, p. 1561-1572, 2013.

LIBRA, J. A.; RO, K. S.; KAMMANN, C.; FUNKE, A.; BERGE, N. D.; NEUBAUER, Y.; TITIRICI, M. M.; FÜHNER, C.; BENS, O.; KERN, J.; EMMERICH, K. H. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. **Biofuels**, v. 2, p. 71-106, 2011.

LIU, C.; WANG, H.; TANG, X.; GUAN, Z.; REID, B. J.; RAJAPAKSHA, A. U.; OK, Y. S.; SUN, H.

Biochar increased water holding capacity but accelerated organic carbon leaching from a sloping farmland soil in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 995-1006, 2016.

LIU, J.; SCHULZ, H.; BRANDL, S.; MIEHTKE, H.; HUWE, B.; GLASER, B. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, p. 698-707, 2012.

MADARI, B. E.; COSTA, A. R.; CASTRO, L. M.; SANTOS, J. L.; BENITES, V. M.; ROCHA, A. O.; MACHADO, P. L. O. A. **Comunicado Técnico 125**. Goiânia, GO. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. 2006. 4 p.

NAVIA, R.; CROWLEY, D.E. Closing the loop on organic waste management: biochar for agricultural land application and climate change mitigation. **Waste Management and Researc**h, v. 28, p. 479-480, 2010.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. D. F.; CARVALHO, M. T. D. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 321-344, 2015.

OLIVEIRA, F. R.; PATEL, A. K.; JAISI, D. P.; ADHIKARI, S.; LU, H. Environmental application of biochar: Current status and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 246, p. 110–122, 2017.

PEREIRA, R. G.; HEINEMANN, A. B.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. D. M.; KLIEMANN, H. J.; SANTOS, A. P. D. Transpiration response of upland rice to water deficit changed by different levels of eucalyptus biochar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 716-721, 2012.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: Agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 761-768, 2012.

PHAM, M.; SCHIDEMAN, L.; SHARMA, B. K.; ZHANG, Y.; CHEN, W. T. Effects of hydrothermal liquefaction on the fate of bioactive contaminants in manure and algal feedstocks. **Bioresource technology**, v. 149, p. 126-135, 2013.

RODRIGUEZ, L. **Integrated Farming Systems for Food and Energy in a Warming.** (Dissertação). Resource-depleting World. Humboldt-Universität zu Berlin , p. 150, 2012.

RUIVO, M. L. P.; AMARANTE, C. B.; OLIVEIRA, M. L. S.; MUNIZ, I. C. M.; SANTOS, D. A. M. Microbial population and biodiversity in Amazonian Dark Earth soils. In: WOODS, W. I.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLEPRINS, A.; REBELLATO, L. **Amazonian dark earths:** wim sombroek's vision. Springer, Dordrecht, 2009. p. 351-362.

SCHOUTEN, S.; van GROENIGEN, J. W.; OENEMA, O.; CAYUELA, M. L. Bioenergy from cattle manure? Implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil. **Gcb Bioenergy**, v. 4, n. 6, p. 751-760, 2012.

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 3, p. 410-422, 2012.

SILVA, G. P. da; MARQUES, S. M. T. Impacto dos maus odores decorrentes da suinocultura na saúde de moradores rurais no município de Concórdia, Santa Catarina, Brasil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 3, n. 2, p. 135-141, 2004.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment. **Soil Research**, v. 48, n. 7, p. 516-525, 2010.

SOHI, S. P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R.; A review of biochar and its use and function in soil. In: SPARKS, D. L. (ed.). **Advances in agronomy**. Burlington: Academic Press, 2010. p. 47-82.

SPOKAS, K. A.; KOSKINEN, W. C.; BAKER, J. M.; REICOSKY, D. C. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. **Chemosphere**, v. 77, n. 4, p. 574-581, 2009.

SUN, F.; LU, S. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties

of clayey soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 1, p. 26- 33, 2014.
TAN, X. F.; LIU, S. B.; LIU, Y. G.; GU, Y. L.; ZENG, G. M.; HU, X. J.; WANG, X.; LIU, S.; JIANG, L. H. Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: multiple applications in environmental protection and energy storage. **Bioresource technology**, v. 227, p. 359-372, 2017.
TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIEKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 875-887, 2018.
ULYETT, J.; SAKRABANI, R.; KIBBLEWHITE, M.; HANN, M. Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 96-104, 2014.
UCHIMIYA, M.; LIMA, I. M.; KLASSON, K. T.; WARTELLE, L. H. Contaminant immobilization and nutrient release by biochar soil amendment: Roles of natural organic matter. **Chemosphere**, v. 80, n. 8, p. 935–940, 2010.
UZOMA, K. C.; INOUE, M.; ANDRY, H.; FUJIMAKI, H.; ZAHOOR, A.; NISHIHARA, E. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. **Soil use and management**, v. 27, n. 2, p. 205-212, 2011.
VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; Van der VELDE, M.; DIAFAS, I. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. **EUR 24099,** p. 162, 2010.
VU, Q. D.; NEERGAARD, A. de; TRAN, T. D.; HOANG, H. T. T.; VU, V. T. K.; JENSEN, L. S. Greenhouse gas emissions from passive composting of manure and digestate with crop residues and biochar on small-scale livestock farms in Vietnam. **Environmental technology**, v. 36, n. 23, p. 2924-2935, 2015.
WANG, G.; LI, Q.; DZAKPASU, M.; GAO, X.; YUWEN, C.; WANG, X. C. Impacts of different biochar types on hydrogen production promotion during fermentative co-digestion of food wastes and dewatered sewage sludge. **Waste management**, v. 80, p. 73-80, 2018.
WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable biochar to mitigate global climate change. **Nature communications**, v. 1, p. 56, 2010.
WINDEATT, J. H., Ross, A. B., Williams, P. T., Forster, P. M., Nahil, M. A., Singh, S. Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. **Journal of environmental management,** v. 146, p. 189-197, 2014.
XU, X.; CAO, X.; ZHAO, L.; SUN, T. Comparison of sewage sludge-and pig manure-derived biochars for hydrogen sulfide removal. **Chemosphere**, v. 111, p. 296-303, 2014.
YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. **Soil science and plant nutrition**, v. 52, n. 4, p. 489-495, 2006.
ZHANG, K.; CHENG, X.; DANG, H.; YE, C.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q. Linking litter production, quality and decomposition to vegetation succession following agricultural abandonment. **Soil Biology and Biochemistry,** v. 57, p. 803-813, 2013.
ZHANG, A.; LIU, Y.; PAN, G.; HUSSAIN, Q.; LI, L.; ZHENG, J.; ZHANG, X. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. **Plant and Soil**, v. 351, p. 263-275, 2012.
ZHENG, H.; WANG, Z.; DENG, X.; HERBERT, S.; XING, B. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. **Geoderma**, v. 206, p. 32-39, 2013.
ZHOU, X.; QIAO, M.; SU, J. Q.; WANG, Y.; CAO, Z. H.; CHENG, W. D.; ZHU, Y. G. Turning pig manure into biochar can effectively mitigate antibiotic resistance genes as organic fertilizer. **Science of The Total Environment**, v. 649, p. 902-908, 2019.